

УДК 551.465.75(262.54)

# ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНО ДЕЙСТВУЮЩЕГО ВЕТРА НА ЦИРКУЛЯЦИЮ ВОД АЗОВСКОГО МОРЯ С УЧЕТОМ И БЕЗ УЧЕТА ВОДООБМЕНА ЧЕРЕЗ КЕРЧЕНСКИЙ ПРОЛИВ

© 2018 г. **Л. В. Черкесов**, Т. Я. Шульга<sup>1</sup><sup>1</sup> *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
e-mail: shulgaty@mail.ru*

Поступила в редакцию 08.09.2015 г., после доработки 02.12.2016 г.

Исследовано влияние движения морской воды через Керченский пролив на экстремальные отклонения уровня и скорости течений в Азовском море, вызываемые действием полей климатического ветра с использованием трехмерной нелинейной модели общей циркуляции океана Принстонского университета (РОМ). Формирование потока воды через пролив вызвано длительным действием атмосферных процессов одного типа. Изучены особенности динамики вод при изменении интенсивности и чередовании направлений действующего ветра. Численные эксперименты проводились для двух вариантов модельных бассейнов Азовского моря: замкнутого (без Керченского пролива) и с жидкой границей, находящейся в Черном море. Результаты моделирования показали, что учет пролива приводит к заметному изменению скоростей установившихся течений и отклонений уровня при скоростях ветра больших 5 м/с. Наиболее существенное воздействие на параметры установившихся движений оказывает скорость генерирующего их ветра, и меньшее – учет водообмена через пролив. Анализ направлений атмосферной циркуляции выявил, что отклик генерируемых ею движений вод через пролив более всего проявляется при действии юго-восточного ветра.

DOI: 10.7868/S0030157418010033

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Азовское море сообщается с Черным через Керченский пролив посредством движения воды, возникающего из-за разности уровней в северной (азовской) и южной (черноморской) частях и под действием ветра, влияние которого на уровень воды в проливе в среднем в 5–6, а при штормах в 10–15 раз сильнее, чем воздействие речного стока [2, 13]. Течения из Азовского моря наблюдаются чаще при северных ветрах, а течение из Черного моря – реже при южных. При этом в узостях скорость течений достигает 154 см/с [19]. Керченский пролив является важной сухоходной магистралью и промысловым районом Азово-Черноморского бассейна. Неустойчивая погода в Керченском проливе, характеризующаяся регулярными сильными порывами ветра и штормами, представляет большую опасность для всех надводных сооружений. Именно из-за них в 1944 году был разрушен мост длиной 4452 м, просуществовавший менее 4 месяцев. К серьезной экологической катастрофе на крымском побережье, вследствие затопления судов и разлива нефти, привел шторм 11 октября 2007 г. Дополнительным антропогенным фактором, влияющим на гидродинамические процессы,

стало начатое (в настоящее время остановленное) строительство дамбы в октябре 2003 г., в результате которого ширина прорана между о. Тузла и Таманским полуостровом сократилась с почти 4 км до 300 м [13].

Численному моделированию динамики вод Азовского моря посвящен цикл работ Филиппова Ю.Г. [14], где впервые на основе линейных двумерных моделей были изучены основные характеристики ветровых течений, сгонно-нагонных процессов для типовых стационарных полей ветра. В рамках теории длинных волн, на основании результатов двумерного моделирования, в работах [9, 10] исследуются течения, свободные и вынужденные колебания уровня Азовского моря. Из современных публикаций по моделированию течений в Азовском море и Керченском проливе известны работы, основанные на анализе результатов двухслойной модели гидродинамики с применением равномерных прямоугольных сеток, использующей уравнения мелкой воды для верхнего слоя и трехмерные уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости в нижнем слое [8, 11, 12]. В [11] с помощью указанной математической модели при отсутствии фоновых стационарных течений получены картины течений при различных ветровых

ситуациях, а также исследовано влияние наличия или отсутствия дамбы вдоль Тузлинской косы на течения в центральной части Керченского пролива. С помощью указанной математической модели и по материалам ежедневных гидрометеорологических наблюдений на береговой базе Южного научного центра РАН проведено восстановление картины аномальных явлений в Керченском проливе [8]. Изучению сгонно-нагонных явлений и течений Азовского моря без учета Керченского пролива посвящены работы [4, 5], в которых с помощью трехмерной нелинейной  $\sigma$ -координатной модели [15, 20] выявлены особенности формирования полей уровня моря и течений, генерируемых различными полями ветра.

Неоднородное распределение глубин в Азовском море (в южной его части до 19 м, и в то же время 0.5–4 м в прибрежных районах – Таманском и Динском заливах) определяет необходимость использования математических моделей со специальными криволинейными координатными системами ( $\sigma$ -координаты). В настоящей работе моделирование циркуляции вод в бассейне с указанной топологией дна и обширными мелководными районами основано на применении модели общей циркуляции океана Принстонского университета (Princeton Ocean Model – POM) [20], адаптированной к району Азовского моря [15].

Настоящая работа посвящена изучению формирования экстремальных величин сгонно-нагонных колебаний уровня и течений в бассейне Азовского моря, имеющего сравнительно малые по отношению к Черному морю размеры, и их отклик на течения, возникающие в Керченском проливе на основе проведения и анализа результатов численных экспериментов. Керченский пролив, занимающий пограничное положение на пресечении сухопутных и морских транспортных путей, вовлечен в активную хозяйственную деятельность, которая является причиной как экологических, так и политических проблем. Актуальность настоящего исследования, связанного с воспроизведением циркуляции вод Азовского моря при условии преграждения Керченского пролива, обусловлена строящимся в этом районе транспортным переходом между Керченским и Таманским полуостровами через остров Тузла и Тузлинскую косу. Он представляет собой комбинацию грунтонасыпных земляных сооружений и расположенных в параллельных осях конструкций для железнодорожного и автомобильного сообщения. Планируемые опоры для автомобильного и железнодорожного мостов будут базироваться на более чем 5500 сваях, что приведет к сужению водной магистрали. Поэтому представляет практический интерес исследование связи между течениями, отклонениями уровня в Керченском проливе, сформированными под действием ветра

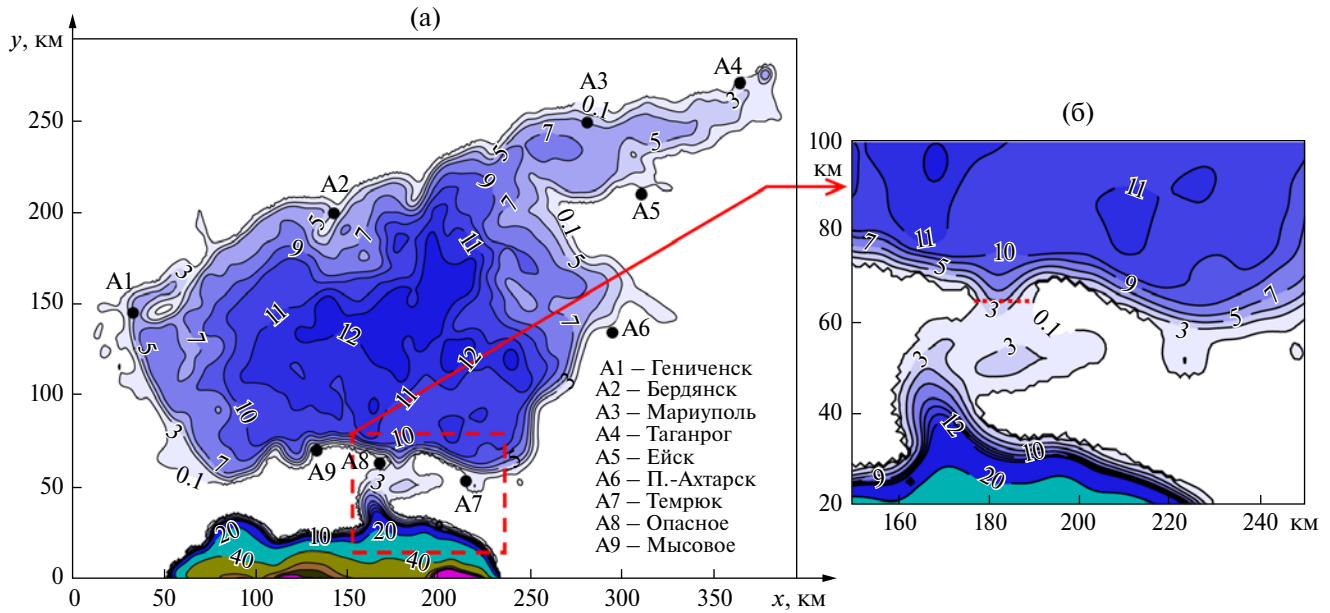
значимых направлений, и экстремальными характеристиками сгонно-нагонных колебаний и течений в Азовском море.

Актуальность численных экспериментов повышает то обстоятельство, что с помощью моделирования можно исследовать не только влияние параметров атмосферных воздействий на циркуляцию вод, но также проверять различные гипотезы, связанные с изменениями разрешения или структуры расчетной области бассейна. В настоящей работе ставится задача определения условий, при которых возможно использование упрощенной модели бассейна Азовского моря с твердой границей на входе в пролив. Очевидно, что в установившемся движении расход воды через Керченский пролив должен быть равен нулю, иначе задача не может считаться установившейся за счет роста или падения уровня Азовского моря в целом за счет расхода воды через Керченский пролив. Это возможно за счет разницы в среднем уровне Азовского моря и в окрестности Керченского пролива, а также за счет изменчивости течений по глубине, или наличия противоположных баротропных течений в проливе. При этом эти течения не могут быть большими в силу мелководности и узкости Керченского пролива в районе Азовского моря. Таким образом, стационарные движения, вызванные постоянным ветром с учетом или без учета Керченского пролива, должны быть практически одинаковыми, и, следовательно, моделирование циркуляции в Азовском море можно проводить без учета водообмена через пролив.

В стационарной задаче ветер и расход воды должны задаваться как два независимых внешних фактора, но, согласно [2], расход пропорционален проекции скорости ветра (среднесуточного) на “ось” пролива, а ветровое воздействие на уровень пролива превосходит его стоковые изменения. С этой целью проведен сравнительный анализ результатов моделирования по сценариям расчетной области, состоящей из Азовского моря и Керченского пролива, и области с упрощенной геометрией – с границей на входе в пролив. Исследованы зависимости величин скоростей поверхностных и глубинных течений, экстремумов сгонов и нагонов от направления и скорости постоянного ветра с учетом и без учета водообмена через пролив.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ИНФОРМАЦИЯ ОБ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ МОДЕЛИ И ЕЕ ПАРАМЕТРАХ

**2.1. Уравнения модели. Начальные и граничные условия.** Математическая модель основывается на уравнениях движения и неразрывности, записанных в декартовой системе координат, в которой



**Рис. 1.** Положение прибрежных станций вдоль побережья Азовского моря (а) и сечения (б), через которое рассчитывается расход воды. Тонкими линиями с числами показаны изобаты. Область пролива заключена в прямоугольнике, очерченным пунктиром.

плоскость  $xOy$  совпадает с невозмущенной поверхностью жидкости, ось  $x$  направлена на северо-восток,  $y$  – на северо-запад,  $z$  – вертикально вверх. Использование декартовых координат в уравнениях движения и неразрывности обосновано в тех случаях, когда горизонтальные размеры бассейна (360 км) много меньше радиуса Земли (6400 км). При этом относительная погрешность численных расчетов для Азовского моря без учета сферичности Земли, рассчитанная по отношению длины дуги земной поверхности [6], стягивающей крайние точки Азовского моря ( $45^{\circ}12'30'' - 47^{\circ}17'30''$  с.ш. и  $33^{\circ}38' - 39^{\circ}18'$  в.д.), к расстоянию между ними по горизонтали равна 0.02%. Уравнения движения в приближение Буссинеска и гидростатики [15, 20] – следующие:

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} A_M \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} K_M \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} A_M \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left( A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} K_M \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

В уравнениях модели и далее используются общепринятые обозначения:  $u(x, y, z, t)$ ,  $v(x, y, z, t)$ ,  $w(x, y, z, t)$  – векторы скорости течения жидкости;  $t$  – время;  $p(x, y, z, t)$  – давление;  $\rho$  – плотность воды;  $g$  – ускорение свободного падения;  $f$  – параметр Кориолиса;  $\zeta(x, y, t)$  – топография свободной поверхности (возвышение уровня моря от его невозмущенного состояния). Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости  $A_M(x, y, z, t)$  вычисляется в зависимости от горизонтальных градиентов скорости с помощью формулы Смагоринского [23], для параметризации коэффициента вертикальной турбулентной вязкости  $K_M(x, y, z, t)$  применяется полуэмпирическая дифференциальная модель Меллора–Ямады [22].

Граничные условия на свободной поверхности имеют вид

$$w|_{z=\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad (5)$$

$$\rho K_M \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=\zeta} = (\tau_{0x}, \tau_{0y}), \quad (6)$$

Здесь  $\tau_{0x} = \rho_a C_a W_x |\mathbf{W}|$ ,  $\tau_{0y} = \rho_a C_a W_y |\mathbf{W}|$  – проекции касательных напряжений ветра;  $\mathbf{W}$  – вектор скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря;  $\rho_a$  – плотность воздуха в стандартных атмосферных условиях;  $C_a$  – эмпирический коэффициент поверхностного трения, зависящий от скорости ветра [21]:

$$C_a = k^2 (14,56 - 2 \ln W_0)^{-2} \quad (7)$$

где  $k = 0.4$  – постоянная Кармана;  $W_0 = |\mathbf{W}|/W_1$ ;  $W_1 = 1$  м/с.

На боковых границах выполняются условия прилипания. При решении задачи с учетом пролива на жидкой границе использовался идеализированный случай задания условий на жидкой границе – принимается условие свободного протекания (равенство нулю производной нормальной составляющей скорости к жидкой границе  $\partial \mathbf{U}_n / \partial \mathbf{n}|_\Gamma = 0$ ). Такой прием был применен для первоначально-го понимания значимости стационарного потока жидкости через пролив. Жидкая граница  $\Gamma$  (рис. 1а) соответствует вертикальному разрезу по  $44.81^\circ$  с.ш. вдоль экватории Черного моря ( $60 \leq x \leq 240$  км,  $y = 0$ ),  $\mathbf{n}$  – нормальное касательное направление. При решении задачи без учета пролива рассматривается замкнутый бассейн, в котором вдоль  $39.33^\circ$  с.ш. имеет место вертикальная боковая стенка (пунктирная линия на рис. 1б).

На дне ( $z = -H(x, y)$ ) равна нулю нормальная составляющая скорости

$$\left( w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) \Big|_{z=-H} = 0. \quad (8)$$

Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [20]:

$$\rho K_M \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H} = (\tau_{bx}, \tau_{by}), \quad (9)$$

где  $\tau_{1x} = c_b u_b |\mathbf{U}_b|$ ;  $\tau_{1y} = c_b v_b |\mathbf{U}_b|$ ;  $c_b$  – коэффициент донного трения, который находится по логарифмическому закону ( $c_b = k^2 [\ln z_b / z_0]^{-2}$ , здесь  $z_b$  – первая ближайшая ко дну точка сетки,  $z_0 = 3$  см – параметр шероховатости донной поверхности);  $\mathbf{U}_b = (u_b, v_b)$  – текущая придонная горизонтальная скорость.

В начальный момент времени  $t = 0$  движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна:

$$\begin{aligned} u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \\ w(x, y, z, 0) = 0, \quad \zeta(x, y, z, 0) = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Приближение к установившемуся режиму оценивается по относительным изменениям кинетической  $E_K(t)$  и потенциальной  $E_P(t)$  энергий, осредненных по объему моря. Считается, что стационарный режим достигается при  $\max \left( \left| \frac{E_K^{n+1} - E_K^n}{E_K^n} \right|, \left| \frac{E_P^{n+1} - E_P^n}{E_P^n} \right| \right) \leq 10^{-3}$ , где  $n$  – номер шага по времени [7]. Исходя из этого,

определяется время установления движения жидкости  $t = t_1$ .

Для расчета водообмена через Керченский пролив на каждом шаге по времени рассчитывается суммарный расход воды, проходящей через сечение, расположенное на широте  $39.33^\circ$  с.ш. (рис. 1б). При этом объем протекающей воды за время  $0 \leq t \leq t_n$  определяется выражением

$$G(t_n) = S \sum_{i=1}^n \overline{U(t_i)} t_i, \quad (11)$$

где  $\overline{U(t_i)}$  – средняя скорость течений в сечении пролива на  $i$ -м временном шаге;  $S$  – площадь сечения.

**2.2. Численная модель.** В исходных уравнениях (1) – (4), граничных условиях (5), (6), (8), (9) и начальных условиях (10) осуществляется переход от координаты  $z$  к безразмерной переменной  $\sigma$  посредством соотношений  $x^* = x$ ,  $y^* = y$ ,  $\sigma = [z - \zeta] / [H + \zeta]$ ,  $t^* = t$ , где  $\sigma \in [-1; 0]$ . Для численных расчетов использована модифицированная версия модели РОМ [15, 20]. Модель модифицирована в блоке расчета значений касательных напряжений трений ветра и расширена путем включения в нее дополнительных блоков для расчета экстремальных отклонений уровня и течений. Количество расчетных уровней сетки по вертикали равнялось 11, при этом применялась версия модели, отличающаяся повышенным пространственным разрешением (линейные размеры ячейки сетки –  $\Delta x = \Delta y \sim 1$  км) по сравнению с прежними реализациями [4, 5]. Уравнения интегрировались с шагом  $\Delta t = 18$  с для определения осредненных двумерных горизонтальных компонент скорости и уровня моря и с шагом  $10\Delta t = 3$  мин – для вычисления отклонений от найденных средних и вертикальной компонент скорости.

Рельеф дна расчетных областей (рис. 1) для двух вариантов модельных сеток интерполирован из массива глубин, снятых с навигационных карт. Первый модельный бассейн Азовского моря – замкнутый с границей на входе в Керченский пролив. Второй – включает Азовское море и Керченский пролив с жидкой границей на разрезе в Черном море. Отклонения уровня моря анализируются на каждой сетке для девяти станций, расположенных вблизи крупных населенных пунктов в соответствии с их географическими координатами.

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Важную роль в исследовании специфических особенностей динамики вод морских бассейнов представляет изучение установившихся режимов. Сезонные особенности погоды в районе Азовского

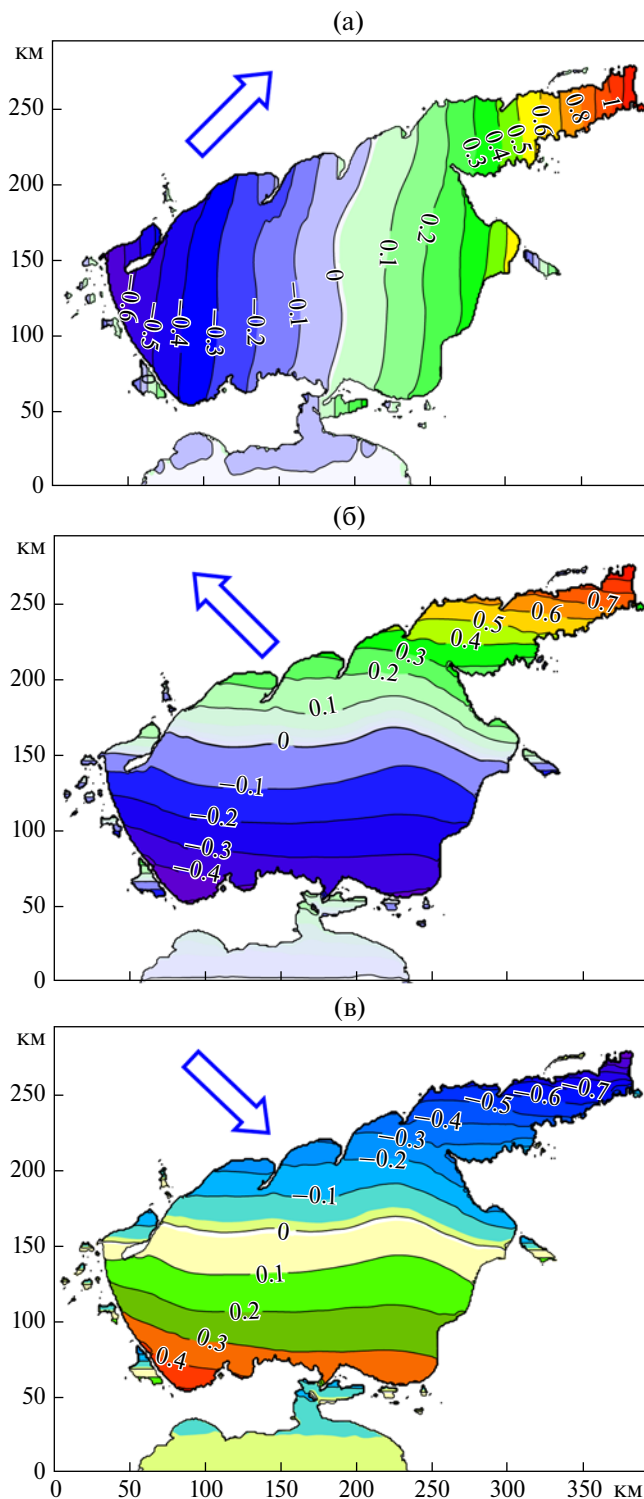
моря формируются под влиянием двух крупномасштабных синоптических процессов – Сибирского и Североатлантического антициклонов. В весенне-летнее время на акваторию моря воздействует отрог Азорского максимума, который обуславливает преобладание юго-западных (ЮЗ) ветров, совпадающих с направлением наибольшей протяженности моря и вызывающих значительные стонно-нагонные процессы в Азовском море, являющиеся причиной ураганных наводнений (в Таганрогском заливе 24 сентября 2014 г. [8]). Воздействие водообмена через Керченский пролив на уровень моря прослеживается при сильных юго-восточных (ЮВ) ветрах, которые увеличивают приток черноморских вод в Азовское море, и при северо-западных (СЗ) ветрах, усиливающих сток азовской воды в Черное море.

На основании данных многолетних инструментальных наблюдений известно, что в проливе преобладает волнение высотой 0.7–1 м, максимальные скорости течений черноморского потока достигают 60–80 см/с, а потока из Азовского моря 40–70 см/с, при их среднегодовой повторяемости 42 и 58% соответственно [2, 3].

Численные эксперименты реализованы для значимых сезонных направлений (юго-западного, северо-западного, юго-восточного) ветра трех скоростей: 5, 10 и 15 м/с. Развитие ветра над поверхностью моря происходит в два этапа. От начального момента времени  $t = 0$  на водную поверхность начинает действовать ветер заданного (постоянного) направления, скорость которого нарастает со временем (3 ч) по линейному закону. Затем скорость ветра в каждой точке акватории достигает заданного значения и далее не меняется.

**3.1. Сравнительный анализ величин сгонов и нагонов на береговых станциях Азовского моря при учете и без учета водообмена через Керченский пролив.** Обобщенную характеристику установившихся движений в море в ходе интегрирования модели дает временной ход отклонений уровня и течений. В серии численных экспериментов изучается влияние интенсивности и направления постоянного ветра на экстремальные стонно-нагонные явления и скорости течений в установившемся режиме. Полученные результаты сравниваются с расчетами, проведенными при моделировании стационарных движений в Азовском море без учета водообмена через Керченский пролив.

На рис. 2 приведены поля уровня моря в момент времени, начиная с которого движения ставятся установившимися ( $t = t_1$ ), генерируемые постоянным ветром различных направлений, действующим со скоростью 15 м/с. Видно, что в установившемся движении при различных направлениях ветра происходит понижение уровня у подветренных



**Рис. 2.** Результаты моделирования смещений уровня (м) Азовского моря в установившемся режиме для различных, показанных стрелками направлений ветра: (а) – юго-западного, (б) – юго-восточного, (в) – северо-западного.

берегов (сгон) и повышение – у наветренных (нагон). Узловая (штриховая) линия ориентирована перпендикулярно направлению действующего ветра, она пересекает центральную часть

**Таблица 1.** Отклонения уровня (см) в установившемся режиме, вызванные постоянным ветром трех скоростей и направлений на береговых станциях Азовского моря, с учетом (1) и без учета (2) пролива

| Береговые станции | Действующий ветер |     |    |    |    |    |        |     |     |     |     |     |        |      |     |     |      |      |
|-------------------|-------------------|-----|----|----|----|----|--------|-----|-----|-----|-----|-----|--------|------|-----|-----|------|------|
|                   | 5 м/с             |     |    |    |    |    | 10 м/с |     |     |     |     |     | 15 м/с |      |     |     |      |      |
|                   | ЮЗ                |     | ЮВ |    | СЗ |    | ЮЗ     |     | ЮВ  |     | СЗ  |     | ЮЗ     |      | ЮВ  |     | СЗ   |      |
|                   | 1                 | 2   | 1  | 2  | 1  | 2  | 1      | 2   | 1   | 2   | 1   | 2   | 1      | 2    | 1   | 2   | 1    | 2    |
| Геническ          | -12               | -12 | 0  | 0  | 0  | 0  | -54    | -52 | -1  | -1  | 1   | 1   | -133   | -120 | -4  | -3  | 3    | 3    |
| Бердянск          | -4                | -4  | -3 | -3 | 3  | 3  | -19    | -18 | 17  | 14  | -18 | -16 | -49    | -44  | 46  | 37  | -43  | -38  |
| Мариуполь         | 10                | 10  | -5 | -5 | 6  | 6  | 40     | 37  | 31  | 24  | -32 | -29 | 92     | 84   | 79  | 58  | -71  | -63  |
| Таганрог          | 21                | 21  | -9 | -8 | 8  | 8  | 81     | 77  | 44  | 33  | -48 | -42 | 143    | 130  | 108 | 81  | -126 | -110 |
| Ейск              | 14                | 14  | -4 | -4 | 4  | 4  | 55     | 52  | 16  | 13  | -16 | -14 | 127    | 117  | 41  | 31  | -32  | -29  |
| П.-Ахтарск        | 10                | 10  | -1 | -1 | 1  | 1  | 46     | 43  | -7  | -6  | 8   | 7   | 121    | 110  | -20 | -15 | 12   | 11   |
| Темрюк            | 6                 | 6   | 3  | 3  | -3 | -3 | 29     | 27  | -22 | -17 | 22  | 20  | 75     | 68   | -59 | -47 | 50   | 43   |
| Опасное           | -4                | -4  | 3  | 3  | -3 | -3 | -17    | -16 | -21 | -16 | 21  | 19  | -43    | -39  | -56 | -43 | 46   | 42   |
| Мысовое           | -7                | -6  | 3  | 3  | -3 | -3 | -27    | -26 | -22 | -17 | 21  | 19  | -67    | -62  | -58 | -42 | 49   | 44   |

моря в зональном (рис. 2б, 2в) и меридиональном (рис. 2а) направлениях. При юго-западном и юго-восточном ветрах наиболее сильному влиянию сгонно-нагонных процессов (нагон до 1.4 м) подвержен Таганрогский залив (рис. 2а, 2б). Штормовой ветер северо-западного направления, наоборот, вызывает сильный сгон воды вдоль восточного побережья (рис. 2в).

В табл. 1 приведены зависимости отклонений уровня ( $|\zeta|$ ) от направления и скорости ветра на береговых станциях Азовского моря в установившемся режиме с учетом и без учета водообмена через пролив. Из анализа приведенных данных следует, что на каждой станции наиболее значимые сгонно-нагонные процессы отмечаются под действием юго-западного ветра бóльших скоростей и при учете водообмена с Черным морем.

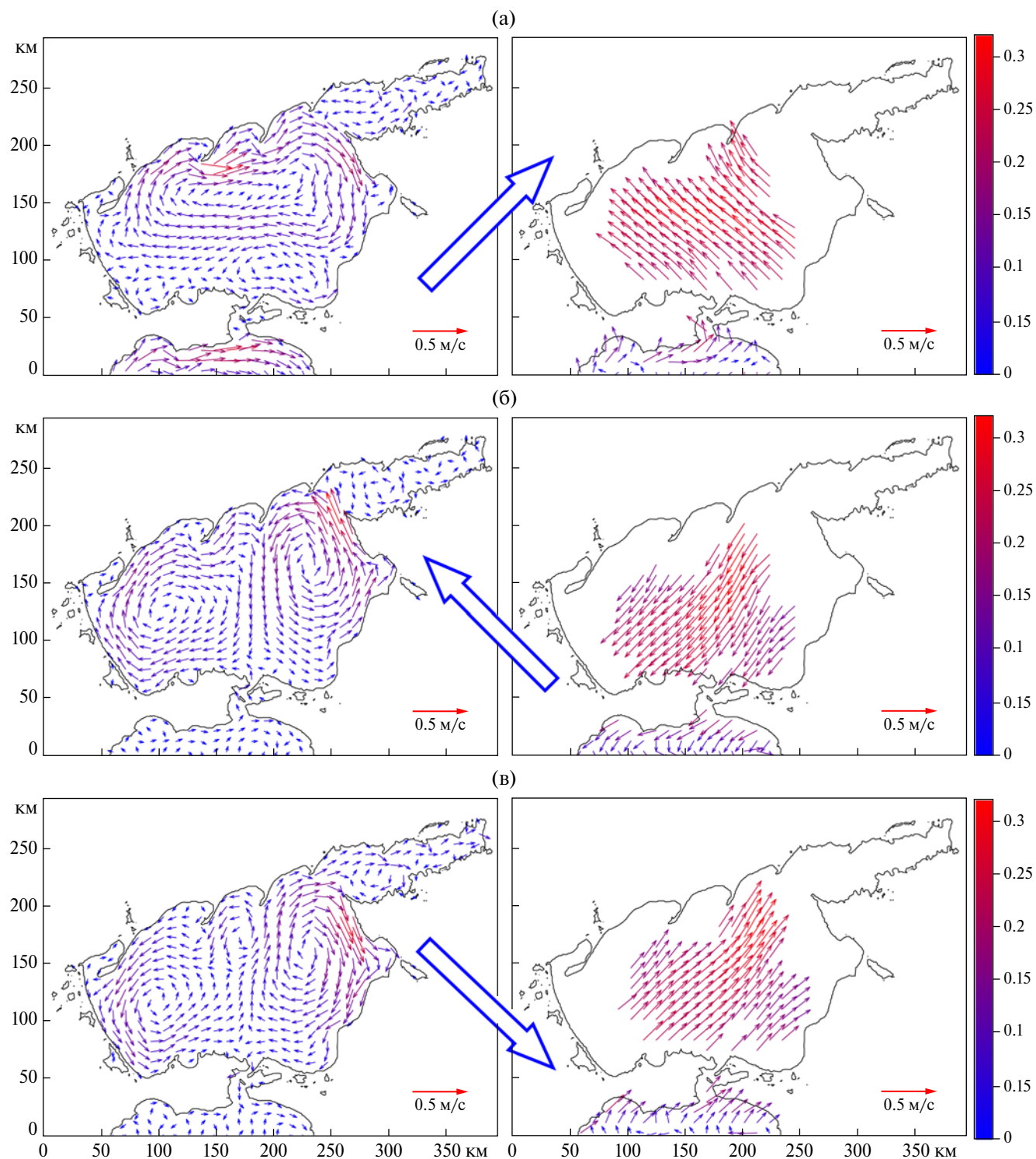
Сравнение величин  $|\zeta|$ , генерируемых ветром одного направления, полученных при решении задачи с учетом и без учета пролива, показывает, что учет водообмена приводит к значительному увеличению отклонений уровня только при скорости ветра, бóльшей 5 м/с. Так, наибольшее различие величин нагонов и сгонов при скорости ветра 10 м/с составляет: 8% (юго-западный ветер), 24% (юго-восточный), 13% (северо-западный); при скорости ветра 15 м/с – 10% (ЮЗ), 27% (ЮВ), 14% (СЗ). Более существенным по сравнению с влиянием учета водообмена через пролив является увеличение скорости действующего ветра. Постоянный ветер одного направления (ЮЗ), но бóльшей

скорости (10 и 15 м/с), приводит к возрастанию отклонений уровня на 62%.

Существенно влияет на амплитуды сгонно-нагонных явлений и направление действующего ветра. Отметим, что на рассматриваемых станциях наибольшие подъемы или опускания уровня происходят при юго-западном ветре. При этом ветре наибольшие нагоны отмечаются на ст. Таганрог (143 см), Ейск (127 см), Приморско-Ахтарск (121 см), а максимальные сгоны – на ст. Геническ (133 см). Ветры других направлений генерируют меньшие по величине отклонения уровня. При юго-восточном ветре наибольшие подъемы уровня имеют место на ст. Таганрог (108 см) и Мариуполь (79 см), максимальные опускания уровня – на ст. Темрюк (59 см), Мысовое (58 см). Северо-западный ветер вызывает наибольшие нагоны на ст. Темрюк (50 см), наибольшие сгоны – на ст. Таганрог (126 см) и Мариуполь (71 см).

Из анализа приведенных данных следует, что вне зависимости от направления ветра в районе Таганрога формируются наибольшие по величине сгоны и нагоны. На ст. Геническ и Бердянск наибольшие сгоны будут развиваться также при юго-западном ветре. Наиболее опасным с точки зрения сгонов для ст. Мариуполь, Таганрог и Ейск является северо-западный ветер, максимальные нагоны здесь вызываются юго-западным ветром. В Приморско-Ахтарске сгоны возникают при юго-восточном ветре, а юго-западный ветер обуславливает существенные подъемы уровня. На ст. Темрюк нагоны развиваются при юго-западном





**Рис. 3.** Результаты моделирования полей стационарных течений Азовского моря на различных горизонтах 1 м (левый столбец), 10 м (правый столбец) для различных, показанных стрелками направлений ветра: (а) – юго-западного, (б) – юго-восточного, (в) – северо-западного при скорости ветра 15 м/с.

ветре, а при юго-восточном ветре – значительные сгоны. В районах ст. Опасное и Мысовое подъемы уровня наблюдаются при северо-западном ветре, они здесь меньше чем сгоны, возникающие при юго-западном и юго-восточном ветрах.

Таким образом, преобладающим фактором, влияющим на величину сгонов и нагонов, являются направление и сила действующего ветра. Наибольшее увеличение амплитуд сгонно-нагонных колебаний, связанное с учетом водообмена через

Керченский пролив, составляет 24% (при юго-восточном ветре), тогда как действие ветра большей скорости приводит к возрастанию этих величин на 62%. Изменение направления ветра с юго-западного на северо-западное приводит на ст. Таганрог к уменьшению нагона на 25 и 38%, с учетом и без учета пролива соответственно.

Установим влияние скорости и направления ветра, а также учета водообмена через пролив, на величину отклонений уровня открытой части Азовского моря в установившемся движении. Анализ результатов расчетов и выполненное затем сравнение двух значений  $|z|$ , полученных при разных условиях в проливе и одинаковом ветровом воздействии, показывает их совпадение до 10% (при скорости ветра 5 и 10 м/с). Сильный юго-восточный ветер со скоростью 15 м/с вызывает наибольшую разницу между амплитудами колебаний уровня, рассчитанными с учетом и без учета водообмена с Черным морем. Для трех исследуемых направлений постоянного ветра она составляет 9, 22 и 12% (ЮЗ, ЮВ и СЗ). Отметим, что более существенное влияние на величину установившихся колебаний в открытом море оказывает скорость действующего ветра (67%).

**3.2. Анализ скоростей стационарных течений в Азовском море при учете и без учета водообмена через Керченский пролив.** На рис. 3 представлены пространственные распределения скорости и направления течений на горизонтах 1 и 10 м в момент времени  $t = t_1$  при постоянном ветре различных направлений со скоростью 15 м/с. Поля течений получены с помощью линейной интерполяции результатов численного моделирования с  $\sigma$ -координатных поверхностей на плоскости  $z = \text{const}$ .

Как показывает анализ приведенных полей, течения в установившемся режиме характеризуются выраженными вихревыми образованиями. Их положение и конфигурация определяются направлением ветра. При этом наиболее интенсивные течения имеют место в глубоководной части моря. При юго-западном ветре в Азовском море возникают две системы круговоротов, которые ориентированы в зональном направлении (рис. 3а). На границе между круговоротами направление потока жидкости ориентировано противоположно действующему ветру. В Таганрогском заливе формируется пара вихрей противоположного знака. При северо-западном ветре в центральной части моря образуются два круговорота противоположного знака (рис. 3в). Бóльший по площади (циклонический) примыкает к западному берегу и содержит в себе малое вихревое образование. Меньший по площади, но более мощный (антициклонический), находится в восточной части моря. Между этими двумя круговоротами располагается узкая полоса

переноса водных масс, ориентированная противоположно ветру. Юго-восточный ветер формирует течения, поля которых являются “зеркальным отражением” полей течений при северо-западном ветре (прослеживается та же конфигурация вихревых образований, но они имеют противоположный знак) (рис. 3б).

На глубине 10 м (рис. 3) в центральной части акватории наблюдаются течения, направление которых отклоняется на  $135^\circ$  и более от направления действующего ветра. Как следует из рис. 3, направления течений через пролив при действии одного и того же ветра в поверхностном и придонном слоях противоположны. Отметим, что в придонном слое под действием юго-западного и северо-западного ветра (рис. 3а, 3в) течения через Керченский пролив направлены из Черного в Азовское море, а в поверхностном слое (рис. 3а, 3в) – в противоположную сторону. При юго-восточном ветре (рис. 3б) течения на глубине 10 м направлены из Азовского в Черное море – обратно своему направлению в поверхностном слое.

В табл. 2 приведены значения скоростей стационарных течений на различных горизонтах в зависимости от скорости и направления ветра при учете и без учета водообмена через пролив. Из анализа этих данных следует, что величины скоростей установившихся течений, найденные методом моделирования с учетом пролива, при действии одного и того же ветра больше, чем без его учета. В этом случае на рассматриваемых горизонтах учет водообмена приводит к разнице величин скоростей течений, не превышающей 45%. Наибольшие скорости течений, вызванные действием ветра одной и той же скорости, отмечаются при юго-восточном ветре, наименьшие – при северо-западном. Так, максимальные скорости поверхностных течений, вычисленные с учетом пролива при скорости ветра 15 м/с, составляют 0.87 м/с (ЮЗ); 1.22 м/с (ЮВ) и 0.99 м/с (СЗ). Относительная разница между наибольшим и наименьшим значениями представленных скоростей составляет 30%. Аналогичное соотношение скоростей течений прослеживается и на других горизонтах при действии постоянного ветра со скоростями 5 и 10 м/с. Таким образом, юго-восточный ветер, действующий вдоль Керченского пролива, вызывает течения, скорости которых превышают (на 12–30%) скорости течений, вызванных юго-западным или северо-западным ветром.

Установим влияние направления и скорости ветра на интегральный водообмен ( $G(t)$ ) через Керченский пролив в установившемся режиме. В численных экспериментах на каждом шаге по времени рассчитаны значения функции  $G(t)$  согласно (11), где значения осредненных по вертикали скоростей течений в проливе проводим в пяти пунктах



**Таблица 2.** Скорости стационарных течений (см/с) на различных горизонтах Азовского моря в зависимости от скорости и направления действующего ветра, полученные с учетом (1) и без учета (2) пролива

| Горизонт,<br>м | Действующий ветер |    |    |    |    |    |        |    |    |    |    |    |        |    |     |    |    |    |
|----------------|-------------------|----|----|----|----|----|--------|----|----|----|----|----|--------|----|-----|----|----|----|
|                | 5 м/с             |    |    |    |    |    | 10 м/с |    |    |    |    |    | 15 м/с |    |     |    |    |    |
|                | ЮЗ                |    | ЮВ |    | СЗ |    | ЮЗ     |    | ЮВ |    | СЗ |    | ЮЗ     |    | ЮВ  |    | СЗ |    |
|                | 1                 | 2  | 1  | 2  | 1  | 2  | 1      | 2  | 1  | 2  | 1  | 2  | 1      | 2  | 1   | 2  | 1  | 2  |
| 1              | 14                | 11 | 16 | 12 | 14 | 11 | 44     | 40 | 46 | 39 | 42 | 41 | 87     | 64 | 122 | 85 | 99 | 69 |
| 3              | 11                | 9  | 13 | 10 | 12 | 9  | 28     | 23 | 38 | 28 | 35 | 28 | 73     | 52 | 113 | 68 | 94 | 57 |
| 5              | 9                 | 8  | 11 | 9  | 10 | 8  | 20     | 14 | 35 | 23 | 31 | 22 | 62     | 39 | 98  | 46 | 79 | 44 |
| 10             | 6                 | 5  | 8  | 6  | 7  | 6  | 17     | 13 | 24 | 16 | 21 | 16 | 41     | 29 | 51  | 35 | 42 | 27 |

равномерно расположенных на разрезе (рис. 16). Отметим, что наибольшего значения скорости течений достигают в центре пролива и зависят от направления действующего ветра (15 м/с): 0.33 (ЮВ), 0.29 (СЗ) и 0.21 м/с (ЮЗ). Они в 1.5 раза превышают скорости течений у западной границы пролива: 0.23 (ЮВ), 0.19 (СЗ), 0.14 м/с (ЮЗ). Величину  $S$  находим на основании реального донного рельефа (средняя глубина сечения пролива составляет 4 м, ширина – 10 км).

Из анализа зависимости от времени интегральных расходов воды (м<sup>3</sup>) через пролив в течение расчетного периода (200 ч) следует, что наибольший объем протекшей воды имеет место при юго-восточном ветре, наименьший – при северо-западном: 53.6 (ЮВ), 26.4 (СЗ), 12.7 м<sup>3</sup> (ЮЗ). Эти результаты согласуются с данными анализа наблюдений о среднегодовом притоке черноморских вод через Керченский пролив, и стоке азовоморских вод в Черное море [16].

Среднегодовое количество воды, протекающей через Керченский пролив за периоды 1927–1940 гг., 1948–1970 гг. составило 50.6 км<sup>3</sup>/год для азовского потока, 32.7 км<sup>3</sup>/год для черноморского, в целом – 17.9 км<sup>3</sup>/год [3], что согласуется с величиной расхода, полученной на основании водного баланса для Азовского моря основанных на измерениях скорости течений [1]. По этим данным (за период с 1963 по 1974 гг. было получено свыше 400 определений расходов воды, измеренных в различные сезоны года и при различных синоптических ситуациях) средние величины расходов равны 77 км<sup>3</sup>/год для азовского и 51 км<sup>3</sup>/год для черноморского течений, с преобладанием азовского потока 26 км<sup>3</sup>/год. Величины этих расходов и площади поперечного сечения в северной устьи Керченского пролива (29 400 м<sup>2</sup>) соответствует средняя скорость течения 1.7 см/с [18]. В случаях штормовых ветров расход, вычисленный по измеренным скоростям течений [1], достигает 315 км<sup>3</sup>/год. При этом скорость течения, осредненная по площади поперечного сечения,

превышает 30 см/с, что согласуется с найденными расходами и средними значениями скоростей течений (табл. 2).

#### 4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе представлены результаты исследования сгонно-нагонных явлений и течений, вызванных действием постоянного ветра в Азовском море. Установлено, что изменчивость водообмена через Керченский пролив хорошо коррелирует с вариациями направлений и интенсивности ветрового воздействия, что оказывает влияние на стационарные движения в Азовском море. Численные решения этой задачи приведены в таблицах величин сгонов, нагонов и скоростей течений для различных характеристик действующего постоянного ветра.

Сформулируем основные результаты выполненных исследований:

- учет водообмена через Керченский пролив заметно влияет на скорости установившихся течений и сгонно-нагонные явления при скоростях ветра, больших 5 м/с;

- численное моделирование установившихся движений в Азовском море при скоростях ветра 10 и 15 м/с, проведенное с учетом водообмена через пролив, показало увеличение не более чем на 25% экстремальных сгонов и нагонов по сравнению с результатами расчетов, полученных без учета пролива;

- юго-восточный ветер при наличии водообмена через пролив генерирует течения, скорости которых на 30% превышают скорости установившихся движений, вызванных юго-западным и северо-западным ветрами;

- наиболее существенное влияние на увеличение экстремумов сгонно-нагонных колебаний в открытом море оказывает скорость действующего

ветра. Так, максимальная разница амплитуд сгонно-нагонных колебаний, вызванных ветром 10 и 15 м/с одного направления, составляет 67%;

– анализ направлений атмосферной циркуляции выявил, что отклик на движение вод через Керченский пролив более всего проявляется при интенсивном юго-восточном ветре, при этом разница величин сгонов и нагонов, полученных с учетом и без учета пролива, не превышает 24%;

– из трех рассмотренных направлений ветра юго-западный вызывает наибольшие значения сгонов и нагонов (до 12%) и отклонений уровня в открытой части Азовского моря (до 29%) вне зависимости от учета водообмена через пролив.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Альтман Э.Н.* К вопросу об изменчивости расходов воды в Керченском проливе (по натурным наблюдениям) // Тр. ГОИН. 1976. Вып. 132. С. 17–28.
2. *Альтман Э.Н.* Динамика вод Керченского пролива // Гидрометеорология и гидрология морей СССР. Т. IV. Черное море. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. С. 291–328.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. 234 с.
4. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование влияния переменного по пространству и времени ветра на течения, сгонно-нагонные процессы и распространение примеси в Азовском море // Метеорология и гидрология. 2012. № 8. С. 69–79.
5. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Динамические процессы и их влияние на трансформацию пассивной примеси в Азовском море // Океанология. 2014. Т. 54. № 4. С. 464–472.
6. *Кожухов В.П., Жухлин А.М.* Математические основы судовождения. М.: Транспорт, 1987. 208 с.
7. *Кордзадзе А.А., Деметрашвили Д.И., Сурмава А.А.* Численное моделирование гидрофизических полей Черного моря в условиях чередования атмосферных циркуляционных процессов // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2008. Т. 44. № 2. С. 227–238.
8. *Матишов Г.Г.* Керченский пролив и дельта Дона: безопасность коммуникаций и населения // Вестник Южного научного центра. 2015. Т. 11. № 1. С. 6–15.
9. *Матишов Г.Г., Инжебейкин Ю.И.* Численные исследования сейшеобразных колебаний уровня Азовского моря // Океанология. 2009. Т. 49. № 4. С. 485–493.
10. *Матишов Г.Г., Савицкий Р.М., Инжебейкин Ю.И.* Условия и последствия аварий судов в Керченском проливе во время шторма 11 ноября 2007 г // Наука юга России. 2008. Т. 4. № 3. С. 54–63.
11. *Матишов Г.Г., Чикин А.Л.* Один из подходов к моделированию ветровых течений в Керченском проливе // Докл. РАН. 2012. Т. 445. № 3. С. 342.
12. *Матишов Г.Г., Чикин А.Л.* Исследование ветровых течений в Керченском проливе с помощью математического моделирования // Наука юга России. 2012. Т. 8. № 2. С. 27–32.
13. *Фащук Д.Я., Овсиенко С.Н., Петренко О.А.* Экологические проблемы Босфора Киммерийского // Черноморский вестник. 2007. № 1. С. 52–58.
14. *Филиппов Ю.Г.* Об одном способе расчета морских течений // Тр. ГОИН. М: Гидрометеоздат, 1970. Вып. 103. С. 87–94.
15. *Фомин В.В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. 2002. Вып. 249. С. 246–255.
16. *Цурикова А.П., Шульгина Е.Ф.* Гидрохимия Азовского моря. М.: Гидрометеоздат, 1964. 258 с.
17. *Чикин А.Л.* Математическая модель ветровых течений в Керченском проливе // Наука юга России. 2009. Т. 5. № 2. С. 58–63.
18. *Шапиро Н.Б.* К теории течений в Керченском проливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря: сб. науч. тр. Севастополь, 2005. Вып. 12. С. 320–331.
19. Black Sea and Sea of Azov. United Kingdom Hydrographic office. First edition, 2003. 292 p.
20. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of three dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coast Ocean Models // Coast. Estuar. Sci. 1987. V. 4. P. 1–16.
21. *Hsu S.A.* A mechanism for the increase of wind stress coefficient with wind speed over water surface: A parametric model // J. Phys. Oceanogr. 1986. V. 16. P. 144–150.
22. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. 1982. V. 20. № 4. P. 851–875.
23. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations. I. The basic experiment // Mon. Wea. Rev. 1963. V. 91. № 2. P. 99–164.

## **Numerical Analysis of the Effect of Speed and Direction of the Duration of Action of the Wind on the Circulation of the Azov Sea Water With and Without Water Exchange Through the Kerch Strait**

**L. V. Cherkesov, T. Ya. Shul'ga**

The influence of the movement of sea water through the Kerch Strait in the extreme deviation level and flow velocity in the Azov Sea caused by the influence of the climatic wind fields using three-dimensional nonlinear model of the general circulation of the ocean at Princeton University (POM). Formation of water flow through the strait due to prolonged action of atmospheric processes of the same type. The peculiarities of water dynamics when changing the intensity and the alternation of the direction of action of the wind. Numerical experiments were performed for two variants of the model basin of the Azov Sea: closed – without the Kerch Strait, and the liquid boundary, located in the Black Sea. The simulation results showed that keeping the Strait leads to a noticeable change in the velocity of steady flows and the level of deviations in wind speeds larger 5 m/s. The most significant impact on the parameters of steady movement has speed wind generating them, and less – keeping water exchange across the strait. Analysis of the trends atmospheric circulation showed that the response generated by its movement through the Strait waters more often seen under the influence of the south-east wind.